



12

## DEMANDE DE BREVET EUROPEEN

21 Numéro de dépôt : 94400145.2

51 Int. Cl.<sup>5</sup> : H04B 10/18

22 Date de dépôt : 24.01.94

30 Priorité : 28.01.93 FR 9300856

43 Date de publication de la demande :  
03.08.94 Bulletin 94/31

84 Etats contractants désignés :  
AT BE CH DE ES FR GB IT LI NL SE

71 Demandeur : ALCATEL N.V.  
Strawinskyalaan 341,  
(World Trade Center)  
NL-1077 XX Amsterdam (NL)

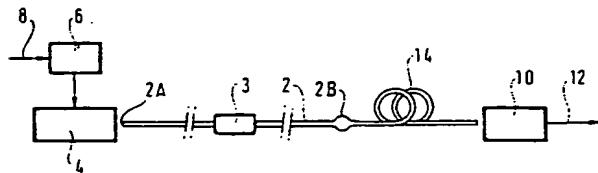
72 Inventeur : Audouin, Olivier  
15, Rue Henri Dunant  
F-91600 Savigny sur Orge (FR)  
Inventeur : Hamaide, Jean-Pierre  
46Bis, Rue du Docteur L Babin  
F-91180 St Germain les Arpajon (FR)

74 Mandataire : Bourely, Paul et al  
SOSPI  
14-16, rue de la Baume  
F-75008 Paris (FR)

54 Système et procédé de transmission à solitons.

57 Des impulsions optiques portant sous forme binaire une information à transmettre sont injectées dans une fibre de ligne transocéanique (2) dans laquelle elles traversent des amplificateurs les affectant d'une gigue de Gordon-Haus. Selon l'invention une fibre de compensation (14) est disposée en sortie de la fibre de ligne pour appliquer à ces impulsions une dispersion chromatique négative (14) compensant partiellement leur gigue avant leur traitement dans un récepteur (10).

FIG.1



La présente invention concerne la transmission d'information sur une fibre optique sous la forme d'impulsions optiques. Il est connu que, dans une telle fibre, la compensation de deux types d'effets peut permettre à des impulsions brèves de forme convenable, appelées "solitons", de se propager sans déformation. L'un de ces types est constitué par un effet dispersif créant une dispersion chromatique qui affecte les vitesses de propagation de groupe de ces impulsions. L'autre est constitué par des effets optiques non linéaires de type Kerr. Ce phénomène de compensation est parfois appelé "effet soliton".

Pour que cet effet soliton soit obtenu plusieurs conditions doivent être satisfaites simultanément: Tout d'abord les impulsions doivent être brèves: Pour une transmission à 10 Gbit/s, par exemple, elles doivent avoir une durée d'environ 20 ps, à mi intensité. La courbe de variation de leur intensité  $I$  en fonction du temps  $t$  doit présenter une forme définie selon l'expression

$$I = 4I_0 / (e^{t/\tau} + e^{-t/\tau})^2$$

$I_0$  étant l'intensité de crête et  $\tau$  étant une durée proportionnelle à la durée de l'impulsion à mi-hauteur. Elles doivent ensuite être "proches de la limite de Fourier", c'est-à-dire que le produit de leur durée par leur largeur spectrale doit être inférieur à une limite d'environ 0,7 et s'approcher autant que possible d'une limite théorique de 0,32. Enfin leur intensité doit être à peu près maintenue en cours de propagation. En ce qui concerne la fibre un rapport convenable doit être réalisé entre d'une part le produit d'une intensité de crête des impulsions optiques par une constante représentative de l'effet Kerr, d'autre part le produit du carré d'une largeur spectrale de ces impulsions par une constante représentative de l'effet de dispersion chromatique apparaissant dans chaque unité de longueur de cette fibre. Cette dernière constante est une dispersion chromatique linéaire dont le produit par la longueur de la fibre constitue une dispersion chromatique globale de celle-ci c'est-à-dire une dispersion chromatique se manifestant entre l'entrée et la sortie de cette fibre. Pour l'obtention de l'effet soliton ces dispersions chromatiques linéaire et globale doivent être positives, ce qui est obtenu si la longueur d'onde centrale de l'impulsion est supérieure à une longueur d'onde qui est caractéristique de la fibre et qui y annule la dispersion.

L'utilisation de l'effet soliton peut présenter des avantages importants dans les liaisons transocéaniques (6000 - 9000 km) à haut débit utilisant un codage binaire. Compte tenu du fait que les fibres optiques présentent des pertes qui provoquent un affaiblissement naturel des impulsions, les grandes distances de transmission peuvent être atteintes par la propagation des solitons dans des fibres dont les pertes sont compensées par des amplificateurs optiques. Ces derniers sont typiquement constitués par des fibres dopées à l'erbium. Ils sont répartis sur la lon-

gueur de la liaison pour limiter les variations de la puissance optique des impulsions afin de leur conserver leur caractère de solitons.

Cependant, le bruit inévitablement émis par ces amplificateurs limite les distances et les débits accessibles, ceci parce que ce bruit provoque une dégradation du rapport signal à bruit et l'apparition d'une "gigue temporelle" des impulsions à l'entrée de l'organe de réception.

10 Cette gigue temporelle est dite de Gordon-Haus. Elle résulte du fait que la superposition du bruit d'amplification à un soliton est équivalente à une modification de la longueur d'onde centrale de ce soliton. Ce changement de longueur d'onde provoque une variation de la vitesse de propagation dans la fibre en raison de la dispersion chromatique de cette dernière. La nature aléatoire du bruit provoque une variation aléatoire de la vitesse des différents solitons et donc, en réception, un déplacement temporel aléatoire des impulsions. Ce déplacement, qui constitue la dite gigue temporelle, est à l'origine d'un accroissement du taux des erreurs de transmission.

20 On peut consulter à ce sujet les deux articles suivants:

- 25 - Gordon and Mollenauer, "Effect of fiber nonlinearities and amplifier spacing on ultra-long distance transmission", J.Lighth. Technol., 9, 170 (1991).  
 30 - Gordon and Haus, "Random walk of coherently amplified solitons in optical fiber transmission", Optics Lett., 11, 665 (1986)

35 Pour minimiser le taux d'erreur d'un système de transmission à solitons deux conditions antagonistes doivent être simultanément remplies. Selon une première condition la gigue temporelle doit être limitée ce qui amène à choisir une fibre présentant une dispersion chromatique linéaire faible. Selon la deuxième condition le rapport signal à bruit doit être maintenu à une valeur suffisamment élevée. Pour cela il est nécessaire que les impulsions transmises présentent une grande énergie. Cette dernière provoque de forts effets non linéaires. Elle impose donc de choisir une fibre de ligne présentant une forte dispersion chromatique linéaire qui est nécessaire pour réaliser la compensation de ces forts effets non linéaires, cette compensation étant elle même nécessaire pour obtenir l'effet soliton.

40 Ces deux conditions amènent à choisir une valeur intermédiaire optimale de la dispersion chromatique linéaire pour minimiser le taux global d'erreurs de transmission. Lorsqu'une telle valeur optimale est réalisée, il apparaît que la dégradation du rapport signal à bruit et la gigue temporelle contribuent toute deux d'une manière importante à ce taux global minimisé.

45 C'est pourquoi il a été notamment proposé de limiter cette gigue temporelle. Deux méthodes connues ont été proposées pour cela. Elles agissent

toutes deux en des points intermédiaires d'une liaison de grande longueur, c'est-à-dire à distance des stations d'émission et de réception.

Une première méthode est connue par un document "10 Gb/s soliton data transmission over one million kilometres", NAKAZAWA, YAMADA, KUBOTA, SUZIKI, Elect. Letters, 27, 1270 (1991). Selon cette méthode on reconstitue de place en place la forme des impulsions pour maintenir à la fois leur caractère de solitons et leurs espacements temporels mutuels.

La deuxième méthode connue a été proposée par un document "Soliton Transmission Control" MECOZI, MOORES, HAUS, LAI, Optics Letters, 16, 1841 (1992). Elle consiste à réaliser de place en place un filtrage fréquentiel des impulsions pour maintenir la valeur de leur longueur d'onde centrale.

Ces deux méthodes connues sont coûteuses car elles présentent de grosses difficultés techniques: synchronisation des modulateurs pour la première et asservissement de la longueur d'onde centrale des filtres pour la seconde.

La présente invention a notamment pour but de limiter d'une manière simple les taux des erreurs de transmission affectant une liaison utilisant des solitons, lorsque ces erreurs résultent au moins en partie d'une gigue temporelle de Gordon-Haus affectant les impulsions reçues.

Et dans ce but elle a notamment pour objet un système de transmission à solitons optiques comportant une fibre de ligne à dispersion chromatique positive et un moyen amplificateur à bruit pour guider et maintenir des solitons portant une information à transmettre, ce système étant caractérisé par le fait qu'il comporte un organe de compensation 14 disposé en aval dudit moyen amplificateur 3, cet organe de compensation présentant une dispersion chromatique négative pour compenser partiellement une gigue temporelle imposée auxdits solitons par le moyen amplificateur 3.

Le fait que la dispersion chromatique globale de cet organe de compensation soit négative entraîne que les impulsions optiques reçues par cet organe y perdent nécessairement leur caractère de solitons, c'est-à-dire qu'elles s'y déforment et, notamment, qu'elles s'y élargissent. Ceci est vrai même si cet organe est constitué par une fibre optique présentant un effet Kerr analogue à celui de la fibre de ligne. Or, il est connu qu'un tel élargissement tend à augmenter le taux d'erreurs de transmission. Il a cependant été trouvé, selon cette invention, qu'en fait la présence d'un tel organe de compensation pouvait diminuer ce taux d'erreur.

A l'aide des figures schématiques ci-jointes, on va décrire plus particulièrement ci-après, à titre d'exemple non limitatif, comment la présente invention peut être mise en oeuvre.

La figure 1 représente une vue d'un système de transmission selon la présente invention.

La figure 2 porte un diagramme représentant la variation d'une valeur optimale d'un taux de compensation, porté en ordonnées, en fonction de la dispersion chromatique linéique d'une fibre de ligne, portée en abscisses.

La figure 3 porte deux diagrammes représentant les variations d'un taux d'erreur porté en ordonnées, en fonction de la dispersion chromatique linéique d'une fibre de ligne, portée en abscisses.

Conformément à la figure 1 un système selon cette invention comporte les éléments suivants qui sont connus quant à leurs fonctions qui vont être indiquées:

- Une fibre de ligne 2 est constituée par une fibre optique de grande longueur. Cette fibre a une entrée 2A et une sortie 2B et présente d'une part une dispersion chromatique linéique positive DL, d'autre part un effet Kerr. Cette dispersion et cet effet Kerr se compensent mutuellement pour conserver la forme d'une impulsion optique guidée par cette fibre lorsque cette impulsion présente une intensité, une durée, une forme de variation et une largeur spectrale caractéristiques d'un soliton de cette fibre. Par ailleurs cette fibre applique un affaiblissement naturel progressif aux impulsions optiques qu'elle guide. C'est pourquoi elle est munie sur sa longueur d'un moyen amplificateur 3 appliquant à ces impulsions une amplification pour compenser au moins partiellement cet affaiblissement naturel. Malheureusement ce moyen amplificateur applique en même temps à ces impulsions un déplacement spectral aléatoire parasite qui, en association avec la dispersion chromatique de cette ligne, entraîne un déplacement temporel aléatoire constituant une gigue temporelle de ces impulsions.
- Une source optique 4 fournit sur commande à l'entrée de la fibre de ligne 2 des impulsions de transmission constituant des solitons de cette fibre.
- Un circuit d'entrée de système 6 reçoit une information à transmettre représentée en 8. Il commande la source optique 4 pour lui faire fournir une succession d'impulsions de transmission. Dans cette succession les intervalles de temps entre les impulsions sont représentatifs de l'information à transmettre. Ces impulsions sont typiquement susceptibles d'être fournies seulement à des instants d'horloge se succédant régulièrement, l'information étant représentée sous forme binaire par la présence ou l'absence d'impulsions à ces instants.
- On prévoit des moyens de compensation de la gigue temporelle.
- Enfin un récepteur 10 reçoit les impulsions de transmission à partir de la sortie 2B de la fibre

de ligne.

Il traite les intervalles de temps entre ces impulsions pour restituer l'information qui était à transmettre et qui est représentée en 12.

Selon la présente invention les moyens de compensation de la gigue temporelle comportent un organe de compensation 14 transmettant les impulsions de transmission entre la sortie 2B de la fibre de ligne et le récepteur 10, et cet organe présente une dispersion chromatique globale négative corrigant partiellement cette gigue temporelle.

On définit un taux de compensation TC tel que la valeur absolue de cette dispersion chromatique globale négative est égale au produit de ce taux de compensation par la dispersion chromatique globale positive introduite par la fibre de ligne 2. De préférence ce taux TC est compris entre 1% et 50% et de préférence encore entre 2% et 20%.

Plus précisément, la réduction de la gigue temporelle est maximale pour un taux de compensation égal à 50%. Cependant l'organe de compensation ne pouvant pas présenter l'effet soliton, il provoque un élargissement des impulsions, et donc une augmentation des erreurs résultant des interférences entre symboles successifs. C'est pourquoi il existe une valeur optimale de la dispersion de l'organe de compensation, réduisant sensiblement la gigue temporelle, sans augmenter exagérément les interférences entre symboles.

À titre d'exemple on considérera ci-après le cas d'une liaison à 5 Gb/s sur 9000 km obtenue de manière connue par la transmission de solitons de 40 ps de durée à mi-hauteur (soit 1/5 du temps bit). En l'absence de tout moyen de compensation de la gigue temporelle une dispersion chromatique linéique optimale de la fibre de ligne est positive et vaut: +0.7 ps/nm.km. Une telle liaison présente un taux d'erreur d'environ  $10^{-15}$ . Avec un organe de compensation selon l'invention présentant une dispersion chromatique globale négative valant: - 1620 ps/nm, c'est-à-dire un taux de compensation TC = 18%, la dispersion chromatique linéique optimale de la fibre de ligne devient 1 ps/nm.km et le taux d'erreur atteint  $10^{-20}$  avec l'aide d'un filtre électrique non représenté qui est incorporé dans le récepteur 10 et qui présente une bande de passante adaptée telle que 3,2 GHz.

Cet organe de compensation peut être simplement constitué par une fibre optique dite "de compensation" présentant une dispersion chromatique linéique négative valant par exemple: - 30 ps/nm.km. Une longueur optimale de cette fibre est alors de 54 km.

Les figures 2 et 3 sont relatives au cas précédemment mentionné, avec l'hypothèse complémentaire que le moyen amplificateur utilisé est constitué d'amplificateurs optiques localisés tels que l'amplificateur 3 et espacés de 30 km. Les dispersions chromatiques linéiques DL de la fibre de ligne sont exprimées en abscisses en ps/nm.km.

Sur la figure 2 le taux de compensation est exprimé en %.

Sur la figure 3 les ordonnées représentent le logarithme du taux d'erreur Log (BER). Le diagramme 20 correspond à l'absence de tout moyen de compensation de la gigue temporelle. Le diagramme 22 correspond à l'utilisation d'un organe de compensation optimisé conformément à la présente invention.

5

## Revendications

1/ Système de transmission à solitons optiques comportant une fibre de ligne à dispersion chromatique positive et un moyen amplificateur à bruit pour guider et maintenir des solitons portant une information à transmettre, ce système étant caractérisé par le fait qu'il comporte un organe de compensation (14) disposé en aval dudit moyen amplificateur (3), cet organe de compensation présentant une dispersion chromatique négative pour compenser partiellement une gigue temporelle imposée auxdits solitons par ledit moyen amplificateur (3).

2/ Système de transmission optique à solitons comportant:

- une fibre de ligne (2) constituée par une fibre optique de grande longueur ayant une entrée (2A) et une sortie (2B) et présentant d'une part un effet dispersif associé à une dispersion chromatique linéique positive (DL), d'autre part un effet Kerr tels que cet effet dispersif et cet effet Kerr se compensent mutuellement pour conserver la forme d'une impulsion optique guidée par cette fibre lorsque cette impulsion présente une intensité, une durée, une forme de variation et une largeur spectrale caractéristiques d'un soliton de cette fibre, cette fibre appliquant un affaiblissement naturel progressif aux impulsions optiques qu'elle guide et étant munie sur sa longueur d'un moyen amplificateur (3) appliquant à ces impulsions une amplification pour compenser au moins partiellement cet affaiblissement naturel, un bruit de ce moyen amplificateur appliquant en même temps à ces impulsions un déplacement spectral aléatoire parasite qui, en association avec ledit effet dispersif de cette ligne, entraîne un déplacement temporel aléatoire constituant une gigue temporelle de ces impulsions,
- une source optique (4) pour fournir sur commande à ladite entrée de la fibre de ligne des impulsions de transmission constituant desdits solitons de cette fibre,
- un circuit d'entrée de système (6) recevant une information à transmettre (8) et commandant ladite source optique (4) pour lui faire fournir une succession de dites impulsions de transmission dans laquelle les intervalles de temps

entre les impulsions sont représentatifs de la-  
dite information à transmettre,  
- des moyens de compensation de ladite gigue  
temporelle,  
- et un récepteur (10) recevant lesdites impul-  
sions de transmission à partir de ladite sortie  
de la fibre de ligne, ce récepteur traitant les in-  
termètres de temps entre ces impulsions pour  
restituer ladite information à transmettre (12),  
ce système étant caractérisé par le fait que lesdits  
moyens de compensation de la gigue temporelle  
comportent un organe de compensation (14) trans-  
mettant lesdites impulsions de transmission entre la-  
dite sortie (2B) de la fibre de ligne et ledit récepteur  
(10) et présentant une dispersion chromatique globa-  
le négative corrigant partiellement ladite gigue tem-  
porelle.

3/ Système selon la revendication 2, caractérisé  
par le fait que ledit organe de compensation (14) pré-  
sente une dispersion chromatique globale négative  
dont la valeur absolue est égale au produit de ladite  
dispersion chromatique linéique positive de la fibre  
de ligne (2) par la longueur de cette fibre et par un  
taux de compensation (TC) compris entre 1% et 50%.

4/ Système selon la revendication 3, caractérisé  
par le fait que ledit taux de compensation est compris  
entre 2% et 20%.

5/ Système selon la revendication 2, caractérisé  
par le fait que ledit organe de compensation (14) est  
constitué par une fibre optique de compensation  
(10).

6/ Procédé de transmission par solitons, procédé  
selon lequel des impulsions optiques portant une in-  
formation à transmettre (8) sont injectées pour con-  
stituer des solitons dans une fibre de ligne (2) compor-  
tant un moyen amplificateur (3), introduisant un bruit  
d'amplification, ce procédé étant caractérisé par le  
fait qu'on fait passer les dites impulsions optiques  
après leur sortie dudit moyen amplificateur (3) dans  
un organe de compensation (14) présentant une dis-  
persion chromatique globale négative.

5

10

15

20

25

30

35

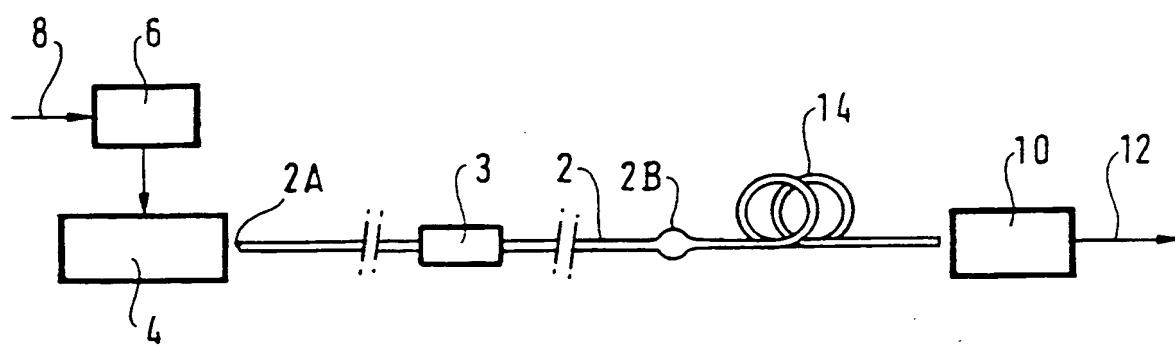
40

45

50

55

FIG.1



TC (%)

30

20

10

0

0 1 2 3

FIG. 2

log(BER)

FIG. 3

↑

-6

-8

-10

-12

-14

-16

-18

-20

0 1 2 3

20

22



Office européen  
des brevets

## RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numéro de la demande  
EP 94 40 0145

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS			
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	Revendication concernée	CLASSEMENT DE LA DEMANDE (Int.CI.)
Y	US-A-4 261 639 (KOGELNIK ET AL)	6	H04B10/18
A	* abrégé; figure 3 *	1,2,5	
	---		
Y	PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 14, no. 301 (P-1069) 28 Juin 1990 & JP-A-20 096 120 (NTT) 6 Avril 1990	6	
A	* abrégé *	1,2,5	
	---		
A	PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 17, no. 182 (P-1518) 8 Avril 1993 & JP-A-04 335 619 (NTT) 24 Novembre 1992	1,2,6	
	* abrégé *		
	---		
A	US-A-4 969 710 (TICK ET AL)	1-3,5,6	
	* abrégé; revendication 1; figure 1 *		
	---		
A	ELECTRONICS LETTERS., vol.28, no.13, 18 Juin 1992, STEVENAGE GB pages 1210 - 1212 S.V.CHERNIKOV ET AL '70 Gbit/s fibre based source of fundamental solitons at 1550 nm' * page 1211, colonne de droite, alinéa 2 -alinéa 3; figure 1 *	1,2,5,6	
	-----		
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (Int.CI.)
			H04B
Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications			
Lieu de la recherche	Date d'achèvement de la recherche	Examinateur	
LA HAYE	22 Avril 1994	Goudelis, M	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS			
X : particulièrement pertinent à lui seul	T : théorie ou principe à la base de l'invention		
Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie	E : document de brevet antérieur, mais publié à la date de dépôt ou après cette date		
A : arrière-plan technologique	D : cité dans la demande		
O : divulgation non-écrite	I : cité pour d'autres raisons		
P : document intercalaire	& : membre de la même famille, document correspondant		

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- BLACK BORDERS**
- IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- FADED TEXT OR DRAWING**
- BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- SKEWED/SLANTED IMAGES**
- COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- GRAY SCALE DOCUMENTS**
- LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- OTHER:** \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**

This Page Blank (uspto)